

## ПІДВИЩЕННЯ ВИЯВЛЯЮЧОЇ ЗДАТНОСТІ НЕЛІНІЙНИХ РАДІОЛОКАТОРІВ

**Максим Зінченко**

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"

УДК 638.235.231

**ПІДВИЩЕННЯ ВИЯВЛЯЮЧОЇ ЗДАТНОСТІ  
НЕЛІНІЙНИХ РАДІОЛОКАТОРІВ**

**Анотація:** Показано, що максимально ефективно нелінійним розсіювачем поглинається енергія тих спектральних складових зонduючого сигналу, довжини хвиль яких порівнянні з довжинами його «випадкових» антен, тому раціональним для практики є використання чергування різних за амплітудою і формою опромінюючих сигналів, що представляють реалізацію випадкового процесу із суцільним спектром.

**Summary:** It is shown that the most efficient by nonlinear scatterer absorbed the energy of the probing signal spectral components which wavelengths are matched with its "random" antennas length, so it is rational in practice to use irradiate signals alternation of different amplitude and shape that represent the realization of a random process of continuous spectrum.

**Ключові слова:** Нелінійний розсіювач, зонduючий сигнал, «електрично малі» антени

**I Вступ**

Нелінійна радіолокація використовується у багатьох сферах людської діяльності: технічний захист інформації, технології військового призначення, нерушливий контроль якості виробів тощо. За її допомогою здійснюється виявлення «закладних» радіоелектронних пристроїв, до складу котрих входять напівпровідникові прилади. Функціонування нелінійних радіолокаторів (НР) пов'язане з ефектом перевипромінювання нелійними розсіювачами (НРс) (еквівалентні антенним структурам з нелінійним навантаженням) у простір під час зондування нових спектральних складових, не характерних для спектру опромінюючого сигналу (кратні гармоніки чи комбінаційні частоти). За результатом аналізу характеристик прийнятих нелінійних продуктів сигналу відгуку оператор виявляє та ідентифікує у досліджуваному середовищі НРс [1].

У реальних умовах на корисний сигнал відгуку від шуканого НРс накладаються спектральні складові з тими ж частотами від випромінювань вузькосмугових сторонніх джерел та відгуків структур типу «метал-окисел-метал» (МОМ-структур).

Вплив зовнішніх завад на НРс може призводити до появи мультиплікативних складових у розсіяному сигналі, що може створити фіктивні сигнали відгуку навіть за відсутності зонduючого сигналу (ЗС) НР. Частота завадового сигналу може виявитися близькою до частоти корисного розсіяного сигналу та потрапити у смугу приймача. Так, сигнали радіотелефону, розташованого на відстані до 20 м від місця проведення роботи, можуть бути зафіксовані як хибні відгуки або створять перешкоди, що ускладнять ідентифікацію об'єктів в режимі прийому другої гармоніки.

Виникнення «хибних» відгуків від МОМ-структур пов'язане з нелінійністю їх симетричної вольтамперної характеристики. Контактні нелійнності є джерелом нелінійних продуктів непарного порядку, а присутні гармоніки парного порядку за рівнем менші на 20 дБ і більше. Селекція шуканих НРс від МОМ-структур здійснюється: за відношенням рівнів прийнятих перевипромінювань другої та третьої гармонік частоти ЗС НР; за характером зміни амплітуди сигналу на виході приймача поблизу перевипромінюючого об'єкта та за реакцією об'єкта на вібродію.

Потужність неперервного ЗС НР в більшості випадків становить 10...850 мВт. Для імпульсного режиму випромінювання пікова потужність в імпульсі 5...400 Вт. Чутливість приймачів сучасних НР лежить у межах від – 80 до – 160 дБВт [1].

Дальність дії НР обмежена величиною близько 1 м та може варіюватися не тільки їх енергетичним потенціалом і коефіцієнтом шуму приймального пристрою, але і паразитними або побічними нелійними ефектами:

- паразитні бічні пелюстки діаграми спрямованості випромінюючої антени НР провокують появу побічних гармонік від навколишніх радіоелектронних засобів;
- наявність у ЗС НР паразитних гармонічних складових, які, відбиваючись від поверхні, попадають у приймальний тракт НР;
- виникнення в досліджуваному об'єкті за певних умов ефектів, які якісно впливають на зміну властивостей його демаскуючих ознак.

## II Постановка задачі

Використання ефекту нелінійного розсіювання в багатьох сферах людської діяльності сприяв появі численних фундаментальних досліджень за тематикою нелінійної радіолокації. Більшість проведених робіт за цим напрямом присвячені задачі підвищення ефективності виявлення, ідентифікації та локалізації нелінійних розсіювачів на фоні різних завад.

Як правило, підвищення ефективності нелінійних радіолокаторів наразі зводиться до збільшення потужності випромінюваного НВЧ-сигналу, підвищення чутливості приймачів, вибору оптимальних параметрів ЗС тощо. Все це вимагає вирішення досить складних схемотехнічних та конструкторських задач електромагнітної сумісності, забезпечення високої точності вихідних параметрів, завадостійкості тощо, при цьому виграш, як правило, незначний та не відповідає витратам.

В Україні сертифікація нелінійних радіолокаторів здійснюється за нормативами документа технічного захисту інформації НД ТЗІ 1.4.–002–08 «Радіолокатори нелінійні. Класифікація. Рекомендовані методи та засоби випробувань».

Поширена технологія нелінійної радіолокації пов'язана з імпульсним випромінюванням. Застосування імпульсного режиму дозволяє, з одного боку, реалізувати високі рівні потужності зонduючого сигналу і, отже, підвищити ефективність виявлення, а з іншого, істотно знизити середню потужність випромінювання до величини, що задовольняє санітарним нормам.

Імовірність вірного розпізнавання НРс (від МОМ-структур) розглянутою технологією залишається досить низькою, близькою до 0,6, оскільки величини прийнятих на гармоніках сигналів залежать, крім властивостей розсіювача, від форм діаграм вторинного розсіювання НРс, які на різних гармоніках можуть відрізнятися між собою. Також важко однозначно ідентифікувати розсіювач через істотну різницю виду залежностей амплітуд нелінійних продуктів з частотами  $2f_{ЗС}$  і  $3f_{ЗС}$  від амплітуди ЗС на частоті  $f_{ЗС}$  у разі спотворення вольт-амперних характеристик (ВАХ) напівпровідникових приладів, що входять до складу НРс (рис. 1) [2]. На рис. 1 наведені результати експериментальних досліджень впливу потужності ЗС НР на спотворення ВАХ напівпровідникового приладу, що пов'язано з детекторним ефектом і розігрівом вільних носіїв зарядів. Ці спотворення призводять до зміни співвідношень між спектральними складовими сигналу відгуку, а значить, зростає ймовірність невірної ідентифікації об'єкта [3].

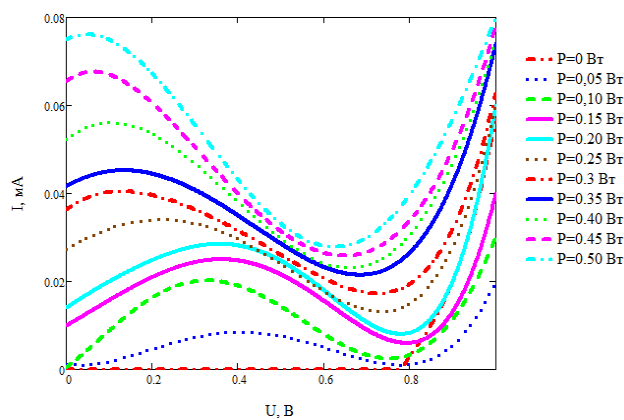


Рисунок 1 – Спотворення ВАХ НВЧ діода типу А606 при різних рівнях потужності ЗС НР

Таким чином, поліпшення виявляючої здатності НР шляхом збільшення потужності випромінювання має обмеження. Підвищення чутливості приймачів передбачає застосування складних у реалізації ефективних алгоритмів виділення корисних інформаційних складових, рівні котрих співрозмірні з шумом. Тому подальший якісний розвиток технології нелінійної радіолокації безпосередньо пов'язаний з технологіями максимізації «нав'язування» енергії зонduючого сигналу нелінійним розсіювачам.

## III Основна частина

Закладний пристрій (НРс) у своєму складі має струмопровідні елементи – ансамбль «випадкових» антен, в навантаженні котрих можуть знаходитися напівпровідникові прилади. При цьому майже всі «випадкові» антени з нелінійним навантаженням «електрично малі», тобто набагато менші довжини хвилі ЗС НР. Наведений у такій антені струм буде незначним, а створюване ним поле дуже слабким у зв'язку з відсутністю ефективного поглинання НРс енергії ЗС через малі розміри приймальної ефективної поверхні.

Поглинена НРс потужність ЗС нелінійного радіолокатора  $P_{\text{НРс}}$  визначається з виразу

$$P_{\text{НРс}} = \Pi_{\text{пад}} S_{\text{НРс}},$$

де  $\Pi_{\text{пад}}$  — щільність падаючого на НР потоку потужності з частотою ЗС НР;

$$\Pi_{\text{пад}} = \frac{P_{\text{НР}} G_{\text{НР}}}{4\pi r^2},$$

$P_{\text{НР}}$  — випромінювана НР потужність зондуючого сигналу;  $G_{\text{НР}}$  — коефіцієнт підсилення випромінюючої антени НР;  $S_{\text{НРс}}$  — площа поверхні НРс, здатна поглинати енергію діючого поля,

$$S_{\text{НРс}} = \lambda_{\text{ЗС}}^2 G_{\text{НРс}} / 4\pi,$$

$G_{\text{НРс}}$  — параметр, що характеризує ефективність приймальної системи НР (коефіцієнт підсилення);  $\lambda_{\text{ЗС}}$  — довжина хвилі ЗС НР.

В остаточному вигляді поглинена НРс потужність ЗС НР дорівнює

$$P_{\text{НРс}} = \frac{P_{\text{НР}} G_{\text{НР}}}{4\pi r^2} \frac{\lambda_{\text{ЗС}}^2 G_{\text{НРс}}}{4\pi}. \quad (1)$$

Введемо коефіцієнт перетворення поглиненої потужності в інший частотний спектр  $\xi_n$ , де  $n$  — номер гармоніки частоти ЗС. Тоді потужність НРс на гармоніці, що випромінюється в ефір, можна визначити за формулою  $P_{n\text{НРс}} = P_{\text{НРс}} \xi_n$ .

Щільність випромінюваного НРс в ефір потоку потужності на гармоніках має вигляд

$$\Pi_{n\text{НРс}} = \Pi_{\text{пад}} S_{\text{НРс}} \xi_n \frac{G_{n\text{НРс}}}{4\pi r^2}, \quad (2)$$

де  $G_{n\text{НРс}}$  — ефективність випромінюючої системи НРс на  $n$ -й гармоніці.

Підставляючи в (2) рівняння (1) отримаємо

$$\Pi_{n\text{НРс}} = \left[ \frac{P_{\text{НР}} G_{\text{НР}}}{4\pi r^2} \cdot \left( \frac{\lambda_{\text{ЗС}}^2 G_{\text{НРс}}}{4\pi} \right) \right] \xi_n \frac{G_{n\text{НРс}}}{4\pi r^2}.$$

Звідси нелінійна ефективна площа розсіювання НРс на гармоніках становить

$$\sigma_{n\text{НРс}} = 4\pi r^2 \frac{\Pi_{n\text{НРс}}}{\Pi_{\text{пад}}} = 4\pi r^2 \left[ \frac{P_{\text{НР}} G_{\text{НР}}}{4\pi r^2} \cdot \left( \frac{\lambda_{\text{ЗС}}^2 G_{\text{НРс}}}{4\pi} \right) \right] \xi_n \times \frac{G_{n\text{НРс}}}{4\pi r^2} \times \frac{4\pi r^2}{P_{\text{НР}} G_{\text{НР}}} = \frac{\lambda_{\text{ЗС}}^2 G_{\text{НРс}}}{4\pi} \xi_n G_{n\text{НРс}}.$$

Зауважимо, що коефіцієнт перетворення поглиненої енергії ЗС в інший частотний спектр  $\xi_n$  для різних гармонік має свою складну залежність від  $\Pi_{\text{пад}}$  і  $\lambda_{\text{ЗС}}$ , тому необхідно провести аналіз впливу довжини ЗС на ефективність поглинання НРс енергії діючого поля НР.

Залежність поглиненої НРс енергії діючого імпульсного НВЧ сигналу  $J_{\text{ЗС}}(x)$  від довжини «електрично малої» антени  $x$  є:

$$J_{\text{ЗС}}(x) = \int D(E) \cdot \varphi(E) \cdot \exp(-\mu(E) \cdot x) dE, \quad (3)$$

де  $D(E)$  — функція спектрального перетворення НРс;  $\varphi(E)$  — спектр імпульсного ЗС НР;  $\mu(E)$  — коефіцієнт послаблення сигналу «електрично малою» антенною.

Рівняння (3) є рівнянням Фредгольма 1-го роду відносно функції  $\varphi(E)$ , яке належить до некоректно поставлених задач, коли незначні флуктуації величини  $J_{\text{ЗС}}(x)$  можуть викликати істотні зміни  $\varphi(E)$ .

Таким чином, максимально ефективно поглинається енергія діючого поля «випадковими електрично малими» антенами НРс для тих спектральних складових зондуючого сигналу, довжини хвиль яких порівнянні з довжинами «випадкових» антен.

Рішення задачі дифракції електромагнітних хвиль для складних «електрично малих» антенних тривимірних структур пов'язане з багатьма труднощами, а саме з неоднорідністю тіл, їх геометричними формами і відсутністю симетрії. Якщо виходити з припущення, що за довжини зондуючої хвилі, багато більшої, ніж характерний розмір НРс, діаграма спрямованості практично однакова для різних конфігурацій і

форм його антенних структур, що займають однаковий об'єм. Тому можна скористатися наступними міркуваннями.

Припустимо, що функція розсіяного типовим розсіювачем з «електрично малою» антеною – симетричним вібратором з нелінійним навантаженням, поля  $U^P(\vec{r}) = U^P$  на відстань  $r$  задовольняє рівнянню  $\Delta U^P + k^2 U^P = 0$  ( $k$  – коефіцієнт поширення) всюди поза НРс, котрий займає область  $D$  з межами  $S$ .

Функція розсіювання відповідає крайовій умові  $(U^P + U^{3C})_S = 0$ , де  $U^{3C}$  – поле зондуючого сигналу НР, а також умові на нескінченності

$$\lim_{r \rightarrow \infty} r \left( \frac{\partial U^P}{\partial r} + ik U^P \right) = 0$$

Внаслідок набагато менших розмірів розсіювача відносно довжини хвилі ЗС, займаний НРс об'єм можна розглядати як тіло обертання, наприклад, сферу. Тоді

$$U^P(\vec{r}) = \int_{\Sigma} I(\vec{r}') \frac{e^{-ikR}}{R} d\sigma$$

де  $I(\vec{r}')$  – наведений струм, розподілений по замкнутій поверхні  $\Sigma$  у межах  $S$ ,  $d\sigma$  – елементарний сегмент поверхні  $\Sigma$ ,  $R$  – радіус об'єму, займаного розсіювачем.

Таким чином, діаграми розсіювання «електрично малими» нелінійними об'єктами характеризуються інтегральним рівнянням

$$\int_{\Sigma} I(\vec{r}') \frac{e^{-ikR}}{R} \Big|_S d\sigma = -U^{3C}(\vec{r}) \Big|_S \quad (4)$$

Знаходження ядра рівняння (4) припускає використання масштабуючої функції і вейвлетів Хаара [3].

На рис. 2. показана, знайдена шляхом розв'язання рівняння (4), діаграма розсіювання симетричним вібратором з нелінійним навантаженням на частоті ЗС, довжина пліч якого на порядок, а радіус на два порядки, менші довжини падаючої хвилі. З чого можна зробити висновок, що навіть «електрично малі» антенні структури мають просторову вибірковість, що також є вагомим чинником при «нав'язуванні» енергії ЗС цим об'єктам.

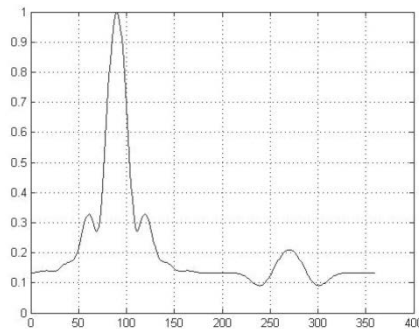


Рисунок 2 – Діаграма розсіювання симетричним вібратором з нелінійним навантаженням на частоті ЗС, довжина пліч якого на порядок, а радіус на два порядки, менші довжини падаючої хвилі

Для типового НРс число «електрично малих» антен, їх довжини і взаємна орієнтація важко прогнозовані, тому не можна однозначно підібрати спектральний склад обмеженого за потужністю ЗС. Збільшення рівнів окремих діапазонів частот спектра ЗС теж є неефективним. Отже, раціональною для практики є реалізація чергування різних за амплітудою і формою ЗС із суцільним спектром [4].

При використанні як мінімум двох різних за формою та/або амплітудою ЗС із суцільним спектром  $x_1(t)$  і  $x_2(t)$  перетворення розсіювачем ЗС є нелінійним, якщо не виконується щодо  $x_i(t)$  рівність

$$u_i(t) = h(t) * x_i(t),$$

де  $u_i(t)$  – відгук об'єкта на  $i$ -му ЗС,  $h(t)$  – імпульсна характеристика НРс,  $*$  – символ згортки, а знак рівності розуміється як тотожність відносно  $x_i(t)$ .

Характеристика нелінійності  $\varepsilon^*(t)$  перетворення сигналів НРс визначається виразом

$$\varepsilon^*(t) = u_1(t) - F^{-1}[1/K(\omega)] * u_2(t), \quad (5)$$

де  $F^{-1}$  – зворотне перетворення Фур'є,  $K(\omega)$  – передавальна функція фазового коректора між спектрами ЗС (відмінність форм ЗС пов'язана з відмінностями їх фазових спектрів).

Характеристика нелінійності (5) відображає нелінійність перетворення сигналів не тільки власне НРс, а й сукупну нелінійність перетворення сигналів випромінювачем НР, розсіювачем і приймачем НР.

Нелінійні спотворення ЗС випромінювачем НР можуть бути враховані, якщо використовувати двоканальний приймач: перший (опорний) канал реєструє ЗС на виході випромінювача НР, а другий (вимірювальний) – відгуки НРс. У такому випадку характеристика нелінійності приймає наступний вигляд:

$$\varepsilon^*(t) = Q_u[u_1(t)] - F^{-1}[F\{Q_u[u_2(t)]\}/F\{Q_x[x_2(t)]\}] * Q_x[x_1(t)], \quad (6)$$

де  $F$  – перетворення Фур'є. Перетворення сигналів приймачем враховується за допомогою нелінійного оператора вимірювального каналу  $Q_u$ , що перетворює часову функцію відгуку об'єкта на вході вимірювального каналу приймача в часову функцію на його виході, і нелінійного оператора опорного каналу  $Q_x$  [4, 5].

У результаті виявляється можливим застосування ЗС з випадковою (наперед не заданою) формою, що дозволяє застосовувати як  $x_1(t)$  і  $x_2(t)$  сигнали, що являють реалізацію випадкового процесу.

Враховувати спотворення сигналів приймачем можливо у випадку лінійного перетворення сигналів об'єктом, тоді (6) відображає нелінійність перетворення сигналів тільки приймачем:

$$\varepsilon_{II}^*(t) = Q_u[h(t) * x_1(t)] - F^{-1}[F\{Q_u[h(t) * x_2(t)]\}/F\{Q_x[x_2(t)]\}] * Q_x[x_1(t)].$$

Таким чином, ефективне виявлення НРс можливе при максимальному поглинанні енергії ЗС НР досліджуванім об'єктом шляхом чергування один за одним різних за амплітудою і формою ЗС, що являють реалізацію випадкового процесу із суцільним спектром.

#### IV Висновки

Імовірність правильної ідентифікації нелінійних розсіювачів (НРс) технологією нелінійної радіолокації є достатньо низькою, оскільки величини прийнятих на гармоніках сигналів залежать, крім властивостей розсіювача, від форм діаграм зворотного розсіювання НРс, які на різних гармоніках можуть відрізнятися між собою. Також важко однозначно ідентифікувати розсіювач через істотну різницю виду залежностей амплітуд нелінійних продуктів від амплітуди зонduючого сигналу в разі спотворення вольт-амперних характеристик напівпровідникових приладів, що входять до складу НРс. Через це поліпшення виявляючої здатності нелінійних радіолокаторів шляхом збільшення потужності має обмеження. При цьому підвищення чутливості приймачів вимагає складно реалізованих ефективних алгоритмів виділення корисних інформаційних складових, порівняних за рівнем з шумом. У зв'язку з чим подальший якісний розвиток технології нелінійної радіолокації безпосередньо пов'язаний з максимізацією «нав'язування» енергії зонduючого сигналу НРс. Оскільки максимально ефективно НРс поглинається енергія тих спектральних складових зонduючого сигналу, довжини хвиль яких порівнянні з довжинами його «випадкових» антен, то раціональним для практики є використання чергування різних за амплітудою і формою зонduючих сигналів, що представляють реалізацію випадкового процесу із суцільним спектром.

Список використаної літератури: 1. Хорошко В. А. Методы и средства защиты информации / В. А. Хорошко, А. А. Чекатков – К.: «Юниор», 2003. – 504с. 2. Горбачев А. А. Амплитудные характеристики нелинейных рассеивателей / А. А. Горбачев, С. В. Ларцов, С. П. Тараканов, Е. П. Чигин // Радиотехника и электроника. – 1996. – Т. 41, № 5. – С. 558–562. 3. Зинченко М. В. Рассеивание плоских волн системой симметричных вибраторов с нелинейными нагрузками при воздействии нелинейного радиолокатора / М. В. Зинченко, Ю. Ф. Зиньковский // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. НТУУ «КПИ». – 2010. – Том 53. – № 10. – С. 24–34. 4. Семенов Э. В. Исследование нелинейности преобразования детерминированных сверхширокополосных сигналов путем линейного комбинирования откликов объекта на линейно зависимые тестовые сигналы / Э. В. Семенов // Изв. Томск. политехн. ун-та. – 2004. – Т. 307, № 4. – С. 18–21. 5. Давенпорт В. Б. Введение в теорию случайных сигналов и шумов / В. Б. Давенпорт, В. Л. Рут. – М.: Изд-во Иностранной Литературы, 1960. – 468 с.